

# 지하철 하저터널 Box 구조물 누수에 관한 연구

[ 서울지하철 5호선 5-42공구 ]

박병진 / 남광토건 기술개발부 부장, 나성윤 / 남광토건 기술개발부 사원

## 공사개요

- 공사명 : 서울지하철 5호선 5-42공구
- 위 치 : 성동구 광장동 ~ 강동구 천호동
- 공 기 : 1990. 11. 2 ~ 1995. 6. 30
- 공사구간 총연장 : L = 1,070 m
- 본선개착(제내지) : L = 49 m
- 본선개착(한강통과구간) : L = 770 m
- 터널구간 : 251 m
- 환기구 : 2개소
- 집수정 : 1개소
- 방수문 : 1개소
- 주요자재 : - 가물막이토랑 : 730,000 m<sup>3</sup>  
 - 레미콘 : 64,500 m<sup>3</sup>  
 - 철근 : 6,200 ton

- 시멘트 : 381,300 포

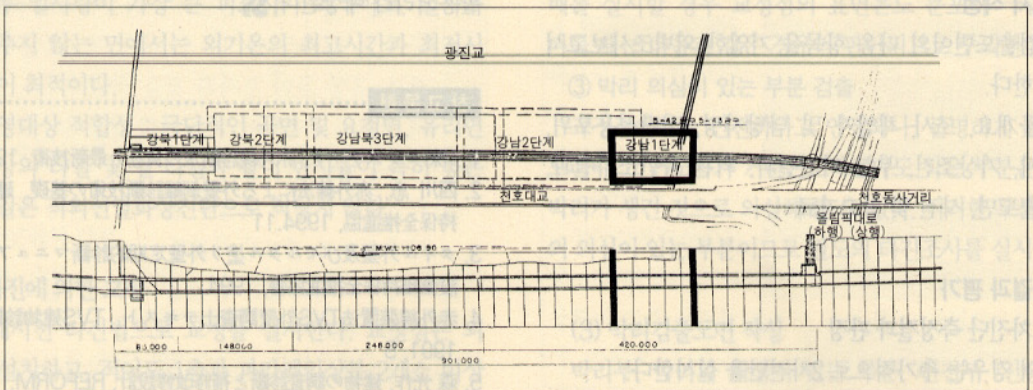
- 강널말뚝 : 9,400 ton

한강하저통과를 위해 이중쉬트파일+토류판공법, 토사가물막이+토류판공법, 가물막이+V-Cut공법을 이용하여 지하철 Box구조물을 시공하였으며, 터널구간의 경우는 250mm의 Shotcrete와 300~1,100mm의 Lining Concrete를 이용한 토사터널공법이 적용되었다.

## 1. 하저터널 방수공사의 일반적 문제점

### 1) 방수 Sheet 자체 결함에 의한 문제점

방수 Sheet 자체의 결함으로 하저 또는 해저와 같이 높은 수압을 장기간 받게 되는 경우 누수가



(그림 1) 서울 지하철 5-42공구 종단선형도



발생할 수 있다. 특히 Asphalt계 방수재의 경우 유연성이 좋지 못하여 콘크리트 표면의 요철 등에 완벽한 접착이 어려울 뿐만 아니라 열처리에 민감하여 가열량 부족시에는 접착성이 부족하게 되고, 가열량이 과다한 경우에는 탄화되어 방수성이 현저하게 감소하는 등 많은 문제점을 내포하고 있다.

## 2) 방수 Sheet 접합부에서 봉합(이음)상의 문제점

방수 Sheet의 접합부는 Sheet 자체면보다 수압 강도, 인열강도, 인장강도 등 여러 가지 강도면에서 취약한 구조를 갖게 되고 시간이 경과함에 따라 느슨해져서 떨어져 나가기 쉬워 수명이 영구적이지 못하다. 또한 하저 등과 같이 지하수의 유출량이 많은 습윤상태에서는 접합부의 확실한 시공이 더욱 어렵다.

## 3) 콘크리트의 요철 등 접촉면에 의한 문제점

방수 Sheet를 부착하는 콘크리트 면에 요철이 발생되어 있거나 콘크리트 수화열에 의해 공극이 발생하는 경우 여기에 응력이 집중되어 누수가 발생하게 된다.

## 4) 콘크리트 타설시의 문제점

하저에 설치되는 콘크리트 Box 구조물의 경우 저판부의 시공시에 방수 Sheet 위에서 철근조립, 콘크리트 타설이 이루어지게 되어 이 경우 방수막의 손상을 가져와 누수의 원인이 되기도 한다.

## 5) Concrete Joint 부위의 문제점

하저에 대단면의 구조물을 시공하게 되는 경우, 막대한 양의 레미콘이 사용되고 작업현장까지의 운반거리가 길어지게 되는 경우 시공이음 등이 생겨 이 부위가 취약 부위가 되어 응력집중 현상이 발생하여 이러한 시공이음 부위를 따라 누수가 발생되기도 한다.

## 6) 작업공간의 문제점

지하철 터널 Box 구조물을 하저에 시공하는 경우 가시설 토류벽과 구조물의 간격이 좁아서 방수공의 시공에 큰 어려움을 겪게 된다. 또한 구조물의 높이가 높은 경우 상부의 방수막 시공을 위해 동바리목 등을 설치하게 되어 누수의 원인이 되기도 한다.

## 2. 지하철 하저터널 Box구조물의 누수발생 원인

### 1) 방수 Sheet 품질상의 문제점

콘크리트 표면을 깨끗이 정리한다 해도 콘크리트 표면에는 요철이 발생하게 된다. 또한 Honey Comb 현상(곰보현상)으로 콘크리트 표면에는 곰보와 같은 미세기포자국이 발생하게 된다. Asphalt계 방수 Sheet는 유연성이 부족하므로 콘크리트의 굴곡면이나 요철, 기포자국을 따라서 완전히 밀착시키지 못한다. 그러므로, 콘크리트와 방수 Sheet의 부착성이 저하된다.

또한, 콘크리트 요철이나 기포자국에 공기가 남아 있게 되면 밤과 낮의 기온차나 계절변화에 따른 온도변화로 인해 수축, 팽창을 반복하게 된다. 콘크리트와 방수 Sheet 사이에 공기가 없더라도, 온도의 상승으로 콘크리트 내부의 수분이 증발하게 되면 방수 Sheet에 Air Hole이 형성되고 시간 경과로 인한 온도변화를 거치면서 수축, 팽창을 반복하게 된다. 이로 인해 부착력은 더욱더 감소하게 되어 콘크리트로부터 방수 Sheet가 떨어져 나갈 수 있다.

방수 Sheet를 콘크리트에 부착하거나 방수 Sheet를 서로 접합시공시, 콘크리트 표면 등에서 분진을 완전히 제거하기가 곤란하고, 굴착에 의한 다량의 물이 내부로 유입되어 습윤상태에서 시공을 하게 되므로 콘크리트와의 부착력은 현저하게 감소되며 이로 인해 누수가 발생할 수 있다.

방수 Sheet를 콘크리트에 부착하거나 방수



Sheet를 서로 접합할 때 가스도치를 사용하는데 현실적으로 적절한 열처리가 매우 곤란하다. 즉 Sheet는 열처리에 매우 민감하여 열처리가 조금만 부족하여도 부착성이나 접합성이 약화되며, 조금만 지나쳐도 Asphalt가 탄화하여 내구성이 저하된다.

이는 방수 Sheet를 설치하는 기능공들의 숙련 정도에 의해 좌우될 정도로 매우 민감한 사항이다.

## 2) 방수 Sheet에 작용하는 수압 및 진동충격에 의한 영향

방수 Sheet에 작용하는 수압과 지하철 운행에 따른 진동충격에 의해 방수 Sheet 자체의 손상 및 접합부의 접착력, 콘크리트와의 부착력이 저하된다.

방수 Sheet는 기능상 첫접이 수압에 못이겨 조금이라도 손상되면 얼마가지 않아 두번째 접도역시 차례로 어렵지 않게 손상될 수 밖에 없다. 이와 같이 방수시공시에 두 Sheet가 완벽하게 접착, 일체화 구조로 기능발휘를 할 수는 없으므로, 애당초 공장 생산단계에서부터 수압에 충분히 견딜 수 있는 성능을 갖도록 품질을 확보하는 것이 매우 중요하다.

그러나 방수 Sheet는 일체화된 구조가 아니라 각기 독립된 구조로 되어 있으므로 1겹의 방수 Sheet가 견딜 수 있는 최대수압까지로 설계하는 것이 바람직하다.

## 3) 시공상 야기될 수 있는 사항

일반적으로 콘크리트 타설을 위해 거푸집을 반

복하여 사용하게 되면 거푸집에 변형이 일어나게 되고, 거푸집 사이의 연결부에 요철이 발생하게 된다. 이로 인해 콘크리트면이 불균일하게 되어 방수 Sheet를 콘크리트에 완전 밀착시키는데 장애가 발생한다.

Box 구조물의 높이가 높으면 방수막 시공을 위해서는 버림 콘크리트로 시공한 Box 구조물의 저판에 설치한 방수 Sheet와 상부 Box에 설치한 방수 Sheet의 접합부는 저판측면 보호벽까지 연결되어 접합되어 있다. 그러나, 시공여건상 거푸집 설치를 위해 저판 보호벽에 못을 박아야 할 경우가 발생한다. 이 경우 실제 방수 Sheet의 접합길이는 못을 설치한 부분부터 Box 구조물 벽까지의 길이로 줄어들게 된다. 또한, Box 구조물 옆의 토류벽에 작용하는 토압을 지지하기 위해 동바리목을 설치하는데, 동바리목이 설치된 부분에는 방수 Sheet를 완벽하게 설치하기가 곤란하다.

토사가물막이 및 가시설 토류벽 설치시, Box 구조물과 토류벽 사이의 간격은 Anchor Head와 띠장을 고려하면 작업공간이 상당히 협소하므로, 방수 Sheet를 정밀하게 시공하는데 많은 제약받을 수 있다.

Box 구조물의 시공이 완성되면 세굴방지공 및 되메우기를 실시하는데 이때 방수 Sheet의 일부가 충격에 의해 손상될 수 있다.

## 4) 평가

하저에서와 같이 높은 수압이 작용하는 위치에서 지하철 Box 구조물 등을 비배수형으로 시공하는 경우 국내에서는 100% 완벽한 차수가 되어야

외국의 지하철 비배수형 터널의 허용누수량

(단위 : l/min/100m)

구분	독일	영국	미국					호주	벨기에	
	STUVA	CIRIA	워싱턴	샌프란시스코	아틀랜타	보스톤	볼티모어	버팔로	멜버른	앤티워프
지하철 단선터널	0.28	1.39	1.25	1.25	1.25	2.5	0.97	0.28	0.14	0.14

\* 위 값은 터널 주변장이 약 20m인 단선터널을 기준으로 환산한 것임



Box 구조물에 이용되는 콘크리트를 수밀 콘크리트로 설계·시공하고 품질관리를 철저히 하며

대단면의 하저 Box 구조물 등을 시공하게 되는 경우, 타설을 위한 콘크리트 플랜트를 현장에 설치하여

적기에 공급하면 Joint 등에 의한 누수발생을 상당히 방지할 수 있다.

하는 것으로 생각해 왔다. 그러나 선진외국의 경우는 완전방수가 현실적으로 불가능하다고 보고 허용누수기준을 설정하여 시행하거나 잠정적인 지침을 마련하고 있다. 즉, 이는 비배수의 개념 자체가 완벽한 100%의 차수가 아닌 누수의 최소화라고 할 수 있다. 따라서 우리나라의 경우도 이러한 사항을 고려하여 비배수 개념에 대한 전환이 필요하다고 본다.

### 3. 개선방안

누수가 발생되지 않게 하기 위해서는 고가의 경비와 노력이 요구된다. 즉, 철판을 이용한 방수를 실시한다든가 하저터널을 완전방수로 설계할 경우 그 수압이 대단하므로 터널 Concrete Lining이 상상할 수 없을 정도로 두꺼워져야 한다는 문제가 대두된다.

근본적으로 지하철 설계에서 완벽한 누수를 달성하여야 할 이유가 타당하지 않으므로 설계상의 완전방수개념을 도입하지 않는 것 즉, 누수를 최소화한다는 뜻으로 개념을 전환하는 것이 누수발생 문제를 해소하는 제1의 개선사항이다. 제2의 개선사항으로는 터널 또는 Box 구조물 주변에 선차수 그라우팅을 완벽하게 실시하여 누수량을 극소화하고 또 방수시공시 건조상태에서 방수막을 설치하며 시공시 Sheet의 손상을 충분히 보호해주는 동시에 수밀 콘크리트(고강도 콘크리트)로 설계하면 누수발생을 상당히 방지할 수 있을 것이다.

지하철 터널 방수공의 설계·시공상 그리고 유지관리 차원에서 누수발생을 최소화하기 위한 개선방안으로서 다음과 같은 몇가지 구체적 사항을 제안한다.

1) 하저에 설치된 Box 구조물의 장기적인 누수·배수가 터널 구조물의 안정에 미치는 영향분석이 면밀히 이루어져야 한다.

누수 또는 유도배수 처리시 구조물내로 지하수가 유입됨으로써 주변 지반의 부동침하 등 구조물의 안정측면에서도 불리할 수 있다. 더욱이 준공 후 지하철 운행으로 인한 진동·충격이 가해지고 장기간의 세월이 흐르게 되면 이와 같은 현상은 가속화될 수 있다. 따라서 설계 단계에서부터 지하수위 변화·지표침하·터널구조물 변위 등에 대한 지속적인 계측관리를 하여 장기적인 안정에 만전을 기하도록 한다.

2) Box 구조물에 이용되는 콘크리트를 수밀 콘크리트로 설계·시공하고 품질관리를 철저히 하며 대단면의 하저 Box 구조물 등을 시공하게 되는 경우, 타설을 위한 콘크리트 플랜트를 현장에 설치하여 적기에 공급하면 Joint 등에 의한 누수발생을 상당히 방지할 수 있다.

외국의 경우 방수의 대부분을 콘크리트 라이닝이 담당하도록 하여 방수효과를 높이고 있으나 국내의 경우 방수 Sheet에만 의존하고 있는 실정이다. 또한 레미콘 이용시 운반에 상당시간이 소요되며 레미콘 수요가 많을 때에는 레미콘 공급이



원활치 않아 불연속적인 시공이 되는 경우가 허다하다. 반면 외국의 경우 대형공사장에는 레미콘 Plant를 설치하여 적기에 공급하고 콘크리트도 400~500kg/cm<sup>2</sup> 고강도화 하는 추세이다. 따라서 콘크리트 타설시 고강도의 수밀콘크리트를 이용하고 연속적인 시공이 가능하도록 한다면 누수발생을 상당히 감소시킬 수 있을 것이다.

3) 공사중 방수 Sheet가 손상되지 않도록 충분히 유의하여야 하며 토류벽체를 통해 유입되는 유입수를 최대한 차단하여 건조상태에서 방수 Sheet를 설치, 시공하여야 한다.

협소한 작업공간에서 철근조립, 콘크리트 타설, 방수재 시공, Concrete면의 요철상태와 봉합시공에서 얼마만큼 정밀하게 시공하느냐가 문제이다. 특히 Box 구조물의 경우 시공시 방수 Sheet 위에서 철근을 조립해야 하는 작업여건상 손상이 크다. 또한 지하 Box 구조물의 방수 시트는 협소한 지하공간에서 거친 콘크리트 구조물에 부착되어야 하므로 시공상의 파손, 온도 변화 및 수직에 따른 영향, 완벽한 접속부 봉합, 장기적인 노후도 등에서 기존에 사용해 온 Asphalt계 Sheet는 양호한 결과를 제공하지 못한 것이 사실이다.

최근에 개발된 벤토나이트계 Sheet는 시공중 파손우려가 적고, 온도 변화 및 수질에 대한 안정성, 그리고 장기적으로 우수한 차수효과가 입증되어 지하 Box 구조물의 방수재로서 적절한 것으로 알려져 있다. 단, 시공중 벤토나이트의 두께가 일정하게 유지될 수 있도록 배면에 충격방지판이 합성된 제품을 사용하는 것이 바람직하다.

Polyway는 경화속도가 매우 빠르므로 수직면이나 사면에도 Spray 사용이 가능하며, 수평면에서는 30초 이내에 보행이 가능하다. 물의 영향을 받지 않으므로 물과 전혀 반응하지 않아 발포를 하지 않고 시공시의 습도, 온도 등 기후에도 거의 영향을 받지 않는다. 완전한 무용제 도료로서 촉매를 함유하고 있지 않으므로 환경을 오염시킬 염

려가 없고 저온에서도 경화하므로 얼음위에서도 도막이 형성된다. 내충격성, 내마모성, 내수성, 내약품성 등 극히 우수한 내구성을 가지고 있다. 도막의 두께를 자유롭게 조절할 수 있고 도장시공시간과 공기가 단축되며, 1회의 시공으로 거의 영구적이기 때문에 보수비용 등이 절감된다.

4) 현재 우리나라의 경우 품질관리, 품질기준, 접합방법, 파손개소의 보수 등 전체적인 시공관리에 대한 기준 및 방법이 미비하여 방수공사시 많은 문제점을 유발하고 있으므로 이러한 기준의 확립이 필요하다.

지하철과 같은 구조물의 방수 공사시 품질관리를 위한 확립된 시험법이 부족하고 그 기준이 미비하여 요구되는 품질의 정량적인 판단이 곤란하다. 또한 접합부위의 경우 접합상태를 판단할 수 있는 확인방법이 불충분하고 누수개소의 경우도 보수의 필요성, 방법 등을 결정할 수 있는 판단방법이 확립되어 있지 않아 공사에 많은 어려움을 초래하고 있다. 따라서 적절한 시험법, 판단기준 등을 확립하는 것이 필요하다.

5) 최근 세계적으로 대도시에서 우려되고 있는 지하수 팽팽, 지하수위 저하 등으로 인한 도시 전체의 압밀침하, 지하수 고갈로 인한 상부지반 식생의 고사 등 자연환경에 미치는 영향을 고려한다면 완전방수형 터널시공이 이상적이긴 하지만 이상과 같이 기술적으로 많은 문제점이 있는 바, 선별적으로 터널의 배수·비배수 형식을 선정함이 바람직하다고 본다.

## 4. 결론

1) 누수발생원인은 방수 Sheet 유연성 부족 등의 이유로 Box 구조물 콘크리트와 방수 Sheet의 부착성 미흡, 방수 Sheet에 작용하는 수압 및 진동충격에 의한 영향, 방수 Sheet 접합시의 접합면



하저에 축조된 지하철 Box 구조물의 경우 높은 수압, 지하철 운행으로 인한

진동·충격, 토류벽을 통해 유입되는 유입수량의 과다, 방수 시공을 위한 작업공간의 부족 등으로

인해 발생하는 미미한 누수는 Box 저부로 유도배수하는 형식으로 처리하여야 한다.

의 분진, 과다한 유입수량으로 습윤상태에서 작업할 경우 접착의 어려움, 가스토치를 이용한 접합면 봉합시의 매우 민감한 열처리 등 방수재료 품질상의 문제점이 가장 큰 원인이다.

2) 콘크리트 타설시 거푸집의 반복사용에 따른 거푸집 연결부위의 콘크리트 요철, 동바리목 설치 위치에 대한 불충분한 방수, Box 구조물과 토류벽 사이의 협소한 작업공간, 되메우기 및 세굴방지공사 시공시의 방수 Sheet의 손상 등 시공시에 불가피하게 발생될 수 있는 방수 Sheet의 불완전한 부착 및 방수 Sheet의 손상 등도 누수의 한 원인이 될 수도 있다.

3) 방수 Sheet 수압강도는 실제 시공되는 방수 Sheet의 겹침 시공이 완전 일체화된 구조로 될 수 없으므로 공장생산단계에서 부터 충분히 견딜 수 있는 성능을 갖도록 품질을 확보하는 것이 바람직하다.

4) 하저에 축조된 지하철 Box 구조물의 경우 높은 수압, 지하철 운행으로 인한 진동·충격, 토류벽을 통해 유입되는 유입수량의 과다, 방수 시공을 위한 작업공간의 부족 등으로 인해 발생하는 미미한 누수는 Box 저부로 유도배수하는 형식으로 처리하여야 한다.

5) 누수가 발생되지 않도록 하기 위해서는 철판을 이용한 방수 또는 콘크리트 라이닝으로 매우

두껍게 하는 등 고가의 경비와 노력이 요구된다. 그러나 근본적으로 지하철 설계에서 완벽한 차수를 달성해야 할 이유가 타당하지 않으므로 설계상의 완전방수개념을 도입하지 않는 것이 즉, 누수를 최소화한다는 개념으로 전환하는 것이 바람직하다. 그리고 굴착전 터널 또는 Box 구조물 주변에 선차수 그라우팅을 완벽하게 실시하여(준공후에도 유지관리상 유리) 건조상태에서 방수 Sheet 시공을 하고 시공중의 Sheet의 손상에 대해 충분히 보호해 주는 동시에, 고강도 수밀 콘크리트로 설계하면 상당히 우수한 누수방지대책이 될 수 있을 것이다. SS

#### 참고문헌

1. 『서울시지하철 터널 방수개념 정립을 위한 연구보고서』, 사단법인 대한토목학회, 1997. 3
2. 『Water Leakages in Subsurface Facilities : Required Watertightness, Contractual Matters, Method of Redevelopment』, A Haacka, 1991. 11
3. 『Polyway Spray 공법 기술자료』, Sun Technochemical CO., LTD.
4. 『ケルタル防水シート』, 和東工業式會社, 1993. 2